

Depth and hydrodynamics as tools to select aquaculture areas in the coastal zone

La profundidad e hidrodinámica como herramientas para la selección de espacios acuícolas en la zona costera

OE Delgado-González^{1*}, JA Jiménez², JL Fermán-Almada³, F Marván-Gargollo¹, A Mejía-Trejo¹, Z García-Esquivel¹

¹ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México. * E-mail: odelgado@uabc.mx

² Laboratori d'Enginyeria Marítima, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, c/ Jordi Girona 1-3, Campus Nord edifici D1, 08034 Barcelona, Spain.

³ Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

ABSTRACT. An index was created for the spatial classification of oyster cultivation areas in terms of their potential productivity in Falsa Bay, San Quintín (Baja California, Mexico). The index included two main variables crucial for oyster development: food availability and depth. Food availability was based on the final distribution of particulate organic material; it is a passive variable that is transported by tidal currents. A balance was obtained between the volume incorporated into the bay by tidal inflow and its consumption by the organisms distributed in the cultivated areas, which are characterized by the percentage of cultivated areas within the bay. The distribution area of depth was obtained from a five-interval classification scale that allowed the identification of the highest and least exposure of the cultivation area to the proposed food availability. Both criteria were combined into one value in order to divide the bay region into zones in relative terms and determine which are the best suited for oyster cultivation. Given the characteristics of the area and production volume, food availability did not appear to be a limiting factor, and culture depth was the main factor controlling the zonal quality. A comparison of the index values and cultivated oyster growth rates showed that the higher index values corresponded to faster growth rates and vice versa.

Key words: *Crassostrea gigas*, oysters, aquaculture, San Quintín, coastal zone.

RESUMEN. Se construyó un índice que permite calificar espacialmente las zonas de cultivo ostrícola en cuanto a su potencialidad productiva en Bahía Falsa, San Quintín (Baja California, México). El índice incorpora las dos principales variables limitantes para el desarrollo del ostión: disponibilidad de alimento y profundidad. La disponibilidad de alimento se caracterizó con base en la distribución final de la concentración de materia orgánica particulada, la cual es tratada como un material pasivo que es transportado por el campo de velocidades asociado con la marea. Se obtuvo un balance a partir del volumen incorporado a la bahía con la marea entrante y el consumo realizado por los organismos distribuidos en las zonas de cultivo, los cuales se caracterizan a través del porcentaje de área dentro de la bahía dedicada a los cultivos. En cuanto a la profundidad, se obtuvo su distribución de área de acuerdo a una clasificación de cinco intervalos que permitió identificar una mayor o menor exposición de los cultivos al alimento disponible propuesto. Ambos criterios se integraron en un valor único que permitió zonificar la bahía en parcelas en términos relativos, indicando cuál de ellas es mejor para el cultivo del ostión. Dadas las características de la zona y los volúmenes de producción, la disponibilidad de alimento no resultó ser un factor limitante, siendo el principal factor que controla la calidad de una parcela la profundidad a la que se desarrolla el cultivo. Al comparar la valoración obtenida con el tiempo de crecimiento de los ostiones cultivados, se encontró correspondencia entre la mayor valoración y el menor tiempo de crecimiento y viceversa.

Palabras clave: *Crassostrea gigas*, ostiones, acuicultura, San Quintín, zona costera.

INTRODUCTION

Among the many activities conducted in coastal areas, aquaculture is probably the one that has seen most growth (FAO 2009). Globally, the average annual growth rate of aquaculture production is 8.8%, but in aquacultural regions of Latin America and the Caribbean it is 22% since this activity was nonexistent between 1950 and 1970 (FAO 2009).

In Mexico, approximately 2% of the 1.9×10^6 km² that comprise the national territory corresponds to protected or

INTRODUCCIÓN

De las actividades que se desarrollan en la zona costera, la acuicultura es la que probablemente más ha crecido (FAO 2009). En el contexto mundial existe un crecimiento anual promedio de 8.8%; sin embargo, en las regiones acuícolas de América Latina y el Caribe, este crecimiento es de 22%, debido a la inexistencia de esta actividad durante el periodo de 1950 a 1970 (FAO 2009).

En México, aproximadamente el 2% de los 1.9×10^6 km² que comprende el territorio nacional corresponde a los

semiprotected coastal areas (Ortiz-Pérez and Lanza-Espino 2006) distributed along the more than 11,000 km of coastline; however, norms and guidelines for commercial aquaculture development were not established until the early 1990s, so this activity is currently at an incipient stage in most coastal areas.

San Quintín Bay (SQB) is one of the protected areas along the Mexican littoral where aquaculture activities have been conducted continuously over more than 30 years. The Pacific oyster *Crassostrea gigas* is extensively cultured in this area using the rack method. Even though most oyster farms use this culture method it is still possible to find differences of more than two months in the time in which the cultured organisms attain commercial size at different sites within the lagoon (García-Esquivel *et al.* 2000).

The main factors involved in the production of bivalves are water temperature, salinity, depth, and food availability. The characteristics of each region, however, determine their importance and dictate which other environmental factors should be analyzed (Héral and Deslous-Paoli 1991).

This study aimed to develop an index that can be used to evaluate the viability of lagoon systems in SQB for bivalve aquaculture. Though the index was developed for SQB, both the method and index itself can be applied to other coastal lagoon environments to assess their potential for bivalve farming operations.

MATERIAL AND METHODS

Study area

Located in a semiarid region on the northwestern coast of the Baja California Peninsula (Mexico), SQB is a coastal lagoon covering an area of approximately 42 km² (fig. 1). A continuous exchange of water between SQB and the Pacific Ocean occurs through a single mouth and tidal currents keep the inner lagoon water vertically well mixed (Millán-Núñez *et al.* 1982). The main channel divides into two arms: the west arm is known as Falsa Bay and the east arm as San Quintín Bay (fig. 1). The water entering SQB has the effect of oceanic upwelling waters, mainly in spring and summer (Hernández-Ayón *et al.* 2004).

During the 1970s, studies were conducted at SQB to establish its viability for aquacultural activities (Chávez-de Nishikawa and Álvarez-Borrego 1974, Lara-Lara and Álvarez-Borrego 1975, Del Valle-Lucero 1979, Monreal-Gómez 1980, Plascencia-Díaz 1980, Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego 1982, Martori-Oxamendi 1989). These studies provided the first biophysical data and, among other findings, it was determined that the system is governed by mixed, semidiurnal tides. A current intensity of 1 m s⁻¹ was recorded during ebb tide at the mouth, and a 40-min time lag was found for the semidiurnal component of the inflowing tide between the mouth and the head of the east arm (Ocampo-Torres 1980).

espacios costeros protegidos o semiprottegidos (Ortiz-Pérez y Lanza-Espino 2006) distribuidos a lo largo de los más de 11,000 km de litoral. Sin embargo, el marco normativo para promover el desarrollo acuícola con fines comerciales en esta zona quedó establecido a principios de los años noventa y actualmente esta actividad se encuentra en una etapa incipiente en la mayor parte de sus costas.

Bahía San Quintín (BSQ) es uno de los espacios protegidos en el litoral mexicano que ha experimentado el uso continuo de suelo con fines acuícolas por más de 30 años. En esta zona existen cultivos extensivos del ostión *Crassostrea gigas* y se emplea la técnica de estantes. Esta técnica de cultivo es similar a la utilizada por la mayor parte de los productores y aun así es posible encontrar diferencias superiores a dos meses en el tiempo que tardan los organismos cultivados en alcanzar la talla comercial en algunos puntos dentro de la laguna (García-Esquivel *et al.* 2000).

Los principales factores ambientales asociados con la producción de bivalvos son la temperatura, la salinidad, la profundidad y la disponibilidad de alimento; sin embargo, las características de cada región determinan su importancia y resaltan la particularidad con la que deben ser analizados otros factores ambientales (Héral y Deslous-Paoli 1991).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un índice que valore la viabilidad de ambientes lagunares para la explotación acuícola de bivalvos y aplicarlo en BSQ. Aunque el índice se desarrolla para BSQ, tanto la metodología seguida como el índice en sí mismo son aplicables a otros ambientes lagunares costeros para valorar su viabilidad acuícola con bivalvos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Bahía San Quintín es una laguna costera con una extensión aproximada de 42 km² localizada en la zona semiárida noroeste de las costas de la península de Baja California, México (fig. 1). El intercambio de agua que tiene BSQ con el Océano Pacífico es permanente a través de su única boca y el efecto de la marea mantiene la mayor parte del cuerpo de agua interior bien mezclado en sus gradientes verticales de propiedades disueltas (Millán-Núñez *et al.* 1982). El canal principal se divide en dos brazos: el brazo oeste, conocido como Bahía Falsa, y el brazo este, conocido como Bahía San Quintín (fig. 1). El agua que inunda BSQ tienen el efecto de las aguas oceánicas de surgencias, principalmente durante primavera y verano (Hernández-Ayón *et al.* 2004).

En BSQ se realizaron estudios orientados a establecer su viabilidad para realizar actividades acuícolas durante los años setenta (Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego 1974, Lara-Lara y Álvarez-Borrego 1975, Del Valle-Lucero 1979, Monreal-Gómez 1980, Plascencia-Díaz 1980, Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego 1982, Martori-Oxamendi 1989). Estos estudios permitieron obtener los primeros datos

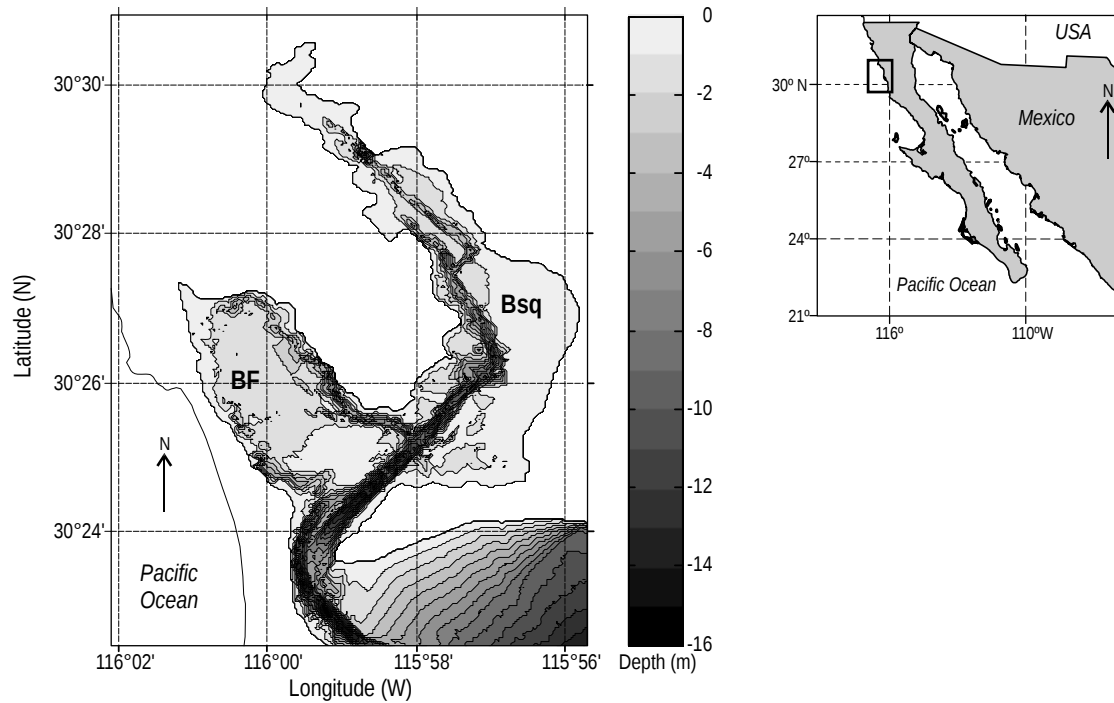


Figure 1. Geographic location of the study area in San Quintín Bay (Baja California, Mexico). The west arm is known as Falsa Bay (BF) and the east arm as San Quintín Bay (BsQ).

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en Bahía San Quintín (Baja California, México). El extremo oeste se conoce como Bahía Falsa (BF) y el extremo este como Bahía San Quintín (BsQ).

As SQB is relatively isolated from important urban centers and residual and industrial discharges, its natural habitat has remained in good condition. Because of this and the type of aquaculture activities being developed in the lagoon, in recent years increasing interest has been paid to SQB and considerable research efforts have focused on characterizing different biophysical aspects (Aguirre-Muñoz *et al.* 2001; Camacho-Ibar *et al.* 2003; Ward *et al.* 2003, 2004; García-Esquivel *et al.* 2004; Hernández-Ayón *et al.* 2004, 2007; Angulo-Larios 2006; Lara-Espinoza 2007; Aveytua-Alcázar 2008; Aveytua-Alcázar *et al.* 2008; Valle-Levinson *et al.* 2009). Information provided by these studies was used to build the index described below.

Development of the biophysical index

The biophysical index (BI) was conceived to evaluate the potential of Falsa Bay (BF) for oyster farming. This index contemplates two key variables for bivalve cultivation: food availability and culture depth. To build the BI, it was first necessary to characterize the spatial distribution of water fluxes and depth in BF during the possible tide and wind conditions. Given that between 90% and 95% of the variance of the surface and bottom currents measured in BF is explained by the tide (Angulo-Larios 2006, Flores-Vidal 2006), we decided to incorporate only the tidal component. Once the water fluxes had been characterized, they were associated

biofísicos, lográndose entre otros avances identificar que el sistema está gobernado por la marea, la cual es mixta con predominancia semidiurna. Se han registrado intensidades de corrientes de marea de 1 m s^{-1} durante el reflujo en la boca y desfases en tiempo de 40 min de la componente semidiurna de la onda de marea entrante entre la boca y la región de la cabeza en el brazo este (Ocampo-Torres 1980).

Bahía San Quintín está relativamente aislada de centros urbanos importantes y de descargas residuales e industriales, lo que ha permitido mantener en buenas condiciones su hábitat natural. Esta característica y la forma de realizar las actividades acuícolas que se desarrollan en su interior han despertado interés y son numerosos los esfuerzos orientados a caracterizar diferentes aspectos biofísicos en BSQ (Aguirre-Muñoz *et al.* 2001; Camacho-Ibar *et al.* 2003; Ward *et al.* 2003, 2004; García-Esquivel *et al.* 2004; Hernández-Ayón *et al.* 2004, 2007; Angulo-Larios 2006; Lara-Espinoza 2007; Aveytua-Alcázar 2008; Aveytua-Alcázar *et al.* 2008; Valle-Levinson *et al.* 2009). Esta información se sintetizó para lograr la construcción del índice que se describe a continuación.

Desarrollo del índice biofísico

Se construyó el índice biofísico (BI) para tener una medida del potencial que posee Bahía Falsa (BF) para su explotación acuícola con ostiones. El BI valora dos variables

with food availability (*IPOMd*), in this case parameterized with the concentrations of particulate organic material (POM, mg L^{-1}) reported for FB (García-Esquivel *et al.* 2004), and normalized depth range (*DRn*):

$$BI = IPOMd \times DRn \quad (1)$$

The spatial distribution of water fluxes in FB is mainly determined by tidal conditions; these fluxes carry food into the bay and vary as the tide changes. To use the range of possible flux intensity, one spring tide condition and one neap tide condition were selected, assuming the following: (a) the flood tide associated with the high-water spring tide represents the moment when the highest volume of water enters the bay and the passive biophysical properties of the inflowing water can be detected at the sites farthest from the mouth, and (b) the volume of oceanic water introduced by tidal inflow is related to the difference between the subsequent height and the time taken to cover that difference. After analyzing the 2009 tidal predictions (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada [CICESE]), the spring tide of 10 January 2009, from 02:00 to 08:00, and the neap tide of 14 to 15 June 2009, from 20:00 to 02:00, were selected to characterize the spatial distribution of water fluxes in FB (fig. 2).

To characterize the associated flux, the MIKE 21 hydrodynamic model (DHI 2008) was used, which resolves the Navier-Stokes equations (conservation of momentum) and the continuity equation (conservation of mass) in two dimensions (vertically integrated) by an implicit finite difference scheme. The model allows the simulation of submerged and exposed areas, activating the cells that have a minimum

clave que controlan la cría de ostiones: la disponibilidad de alimento y la profundidad a la que se encuentran los cultivos. Para la construcción del BI se requiere caracterizar la distribución espacial de los flujos de agua y de la profundidad en BF durante las posibles condiciones de marea y viento. Dado que entre 90% y 95% de la varianza de las corrientes medidas en superficie y fondo en BF está explicada por la marea (Angulo-Larios 2006, Flores-Vidal 2006), en este trabajo se optó por incorporar sólo la componente de marea. Una vez que se caracterizaron los flujos de agua, se asociaron con la disponibilidad de alimento (*IPOMd*), en este caso caracterizado con los valores de las concentraciones de la materia orgánica particulada (POM, mg L^{-1}) reportados para BF (García-Esquivel *et al.* 2004) y el intervalo de profundidad normalizada (*DRn*):

$$BI = IPOMd \times DRn \quad (1)$$

La distribución espacial de los flujos en BF está determinada principalmente por el estado de la marea. Estos flujos incorporarán el alimento a la bahía y varían a medida que cambia la carrera de marea. Para usar el intervalo de posibles intensidades del flujo, se tomó una condición de marea viva y otra de marea muerta. Así, se tomaron en cuenta los siguientes supuestos: (a) la marea llenante asociada con la pleamar de la marea viva representa la situación en la que se incorpora un mayor volumen de agua a la bahía y las propiedades biofísicas pasivas en el agua entrante se pueden detectar en los lugares más alejados de la boca, y (b) el volumen de agua oceánica que introduce el flujo de marea entrante está relacionado con la diferencia entre la altura subsiguiente y el tiempo que tarda en cubrir esa diferencia. Con base en esto,

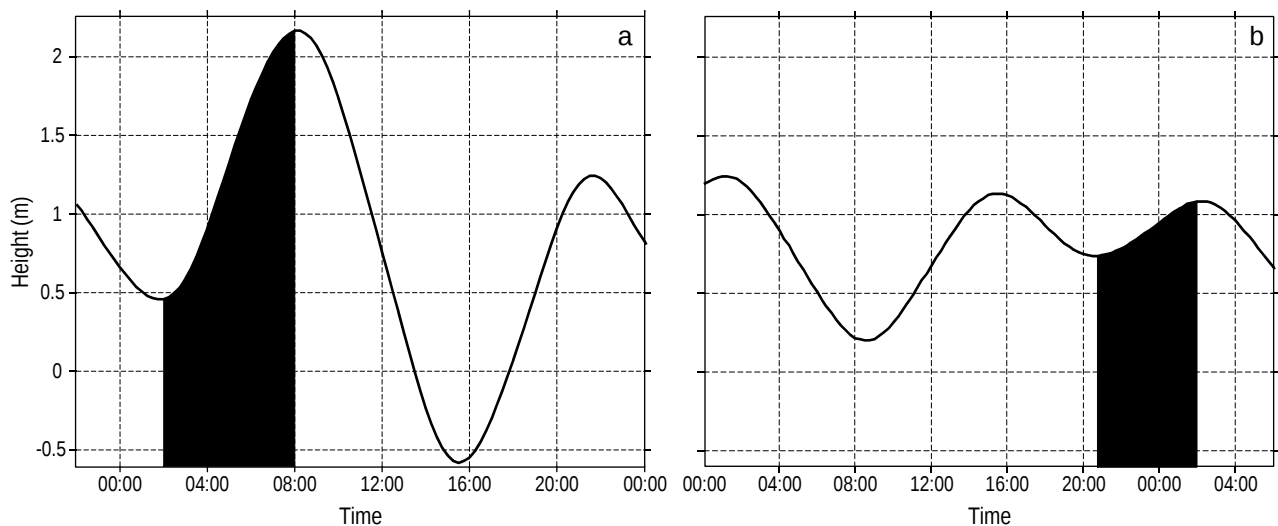


Figure 2. Tidal cycles selected for the spatial distribution of fluxes in Falsa Bay: (a) spring tide of 10 January 2009 and (b) neap tide of 14 June 2009.

Figura 2. Periodos de marea utilizados para obtener la distribución espacial de los flujos en Bahía Falsa durante (a) marea viva el 10 de enero de 2009 y (b) marea muerta el 14 de junio de 2009.

depth (which in the case of the study area was taken to be 7 cm) and deactivating the cells whose depth falls below a certain value. This capability is particularly relevant in a system like SQB, where the submerged area at low tide is significantly less than that at high tide. The model was implemented using a rectangular 100-m grid and was forced using time series of the tide at the lagoon mouth. To calibrate the model, we used time series of current velocities, measured by an acoustic Doppler current profiler (ADCP), during spring and neap tides at two internal points of FB.

For the spatial analysis, FB was divided into a series of elements or boxes (fig. 3) based on the morphology and the orientation of the high-water spring tide velocity field derived from the MIKE 21 model (fig. 4). The orientation of the velocity field was used to define three longitudinal axes: the first delimiting the course of the secondary channel on the east side of FB, the second delimiting the central part of FB by the convergence observed from the velocity field, and the third, the shortest, delimiting a space with eddy-type movement in the northwestern part of FB. The morphological criterion was used to define the southern limit of FB, which consisted of incorporating the most area possible by plotting a line from the sandbar to the central coastal area, taking care not to include the area corresponding to the main channel. A sectionalization was obtained consisting of five horizontal and three vertical rows, whose intercepts define 15 boxes,

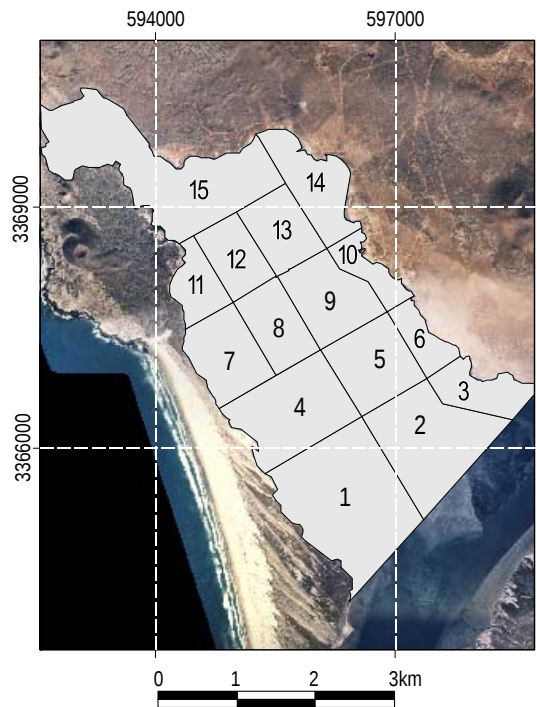


Figure 3. Distribution of the 15 boxes used to calculate the distribution of particulate organic material and depth in Falsa Bay.

Figura 3. Distribución de las cajas (enumeradas) utilizadas para calcular la distribución de materia orgánica particulada y de la profundidad en Bahía Falsa.

se realizó un análisis a partir de las predicciones de marea del año 2009 (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada [CICESE]) y se eligieron la marea viva del 10 de enero de 2009, en el periodo de 2:00 a 8:00, y la marea muerta de las 20:00 del día 14 de junio a las 2:00 del día 15 de junio de 2009 como condiciones de los casos utilizados para caracterizar la distribución espacial de los flujos en BF (fig. 2).

Para caracterizar el flujo asociado, se utilizó el modelo hidrodinámico MIKE 21 (DHI 2008), el cual resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de momentum) y la ecuación de continuidad (conservación de masa) en dos dimensiones (integrado en la vertical) mediante un esquema de diferencias finitas implícito. El modelo permite la simulación de áreas sumergidas y expuestas, lo cual activa las celdas que tengan una profundidad mínima (que para la zona de estudio se tomó como 7 cm), y desactiva las celdas cuya profundidad es inferior a un valor determinado. Esta capacidad es especialmente relevante en un sistema como BSQ, donde el área sumergida en marea baja es significativamente menor que el área sumergida en marea alta. El modelo se implementó usando una malla rectangular con tamaño de 100 m y se forzó utilizando series temporales de la marea en la boca de la laguna. Para calibrar el modelo se utilizaron series de tiempo de velocidad de corrientes en marea viva y marea muerta en dos puntos internos de la BF, las cuales fueron medidas mediante un perfilador de corrientes ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Para el análisis espacial, se dividió BF en una serie de elementos o cajas (fig. 3) utilizando como criterios la morfología y la orientación del campo de velocidades de pleamar de marea viva llenante obtenido con el modelo MIKE 21 (fig. 4). La orientación del campo permitió definir tres ejes longitudinales a lo largo de BF: un eje delimitó el cauce del canal secundario en el costado este, el segundo la parte central de BF por la convergencia observada del campo de velocidades y el último, el más corto, delimitó un espacio con movimiento tipo giro en la parte noroeste de BF. El criterio morfológico se utilizó para seleccionar el límite de la frontera sur de BF, y éste consistió en incorporar la mayor área posible trazando una línea de la barra de arena hacia la región costera central, cuidando no incorporar la zona del canal principal. Se obtuvo así un seccionamiento de cinco franjas horizontales y tres verticales, cuyos cruces definen 15 cajas, enumeradas en orden creciente partiendo del límite suroeste de la frontera sur de BF.

En cada caja se ubicaron los estantes identificados en trabajo de campo. En términos generales, cada estante está constituido por 120 sargas y cada sarga tiene un número variable de individuos; sin embargo, se reconoce que una buena cosecha se obtiene cuando cada sarga posee tres docenas de individuos, cantidad que se eligió para calcular el número de ostiones por caja control. Se calculó un total aproximado de 37.6 millones de individuos para BF al extrapolar el

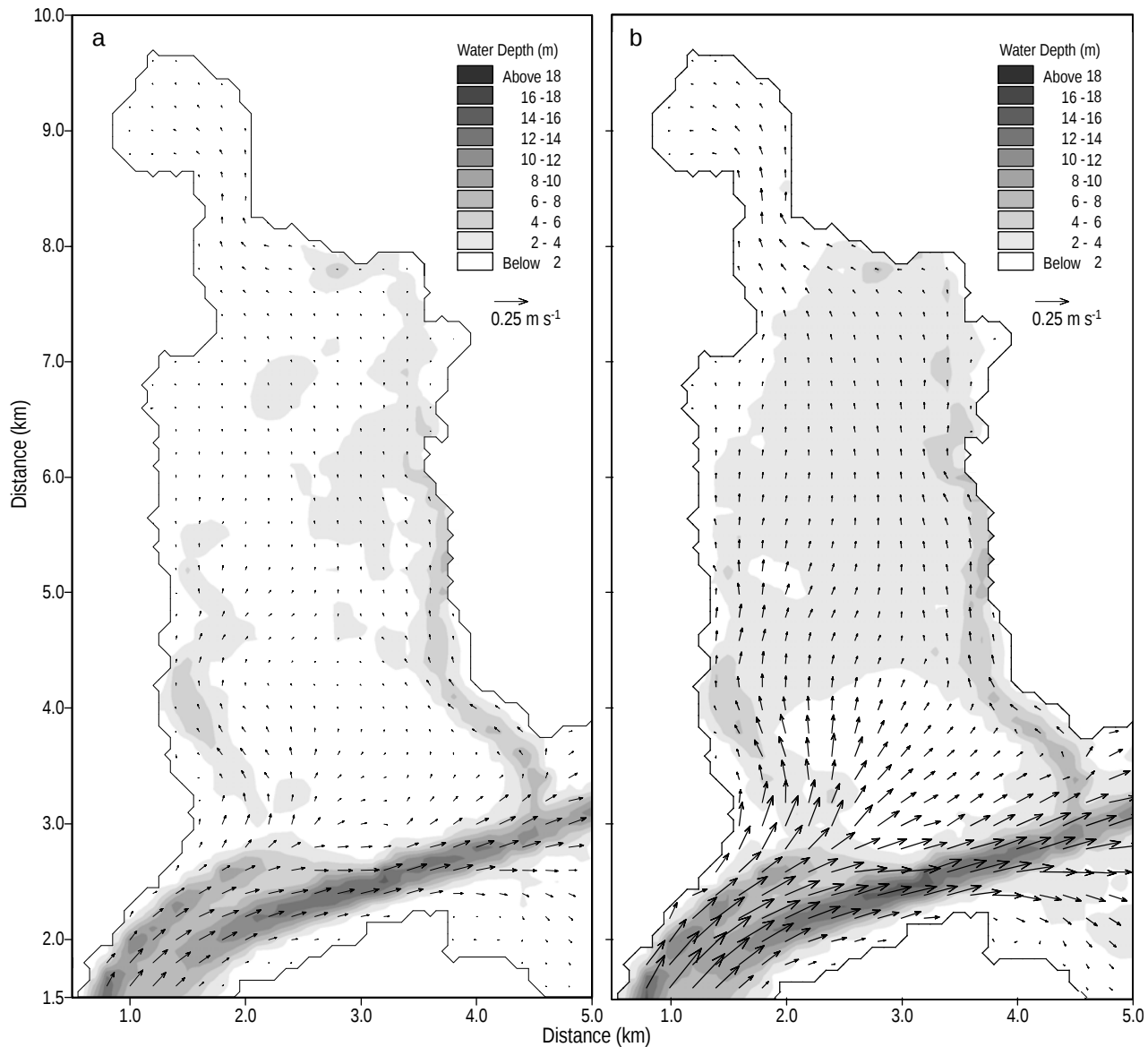


Figure 4. Magnitude and direction of the maximum current velocity observed in Falsa Bay during high waters of (a) neap tide and (b) spring tide.

Figura 4. Magnitud y dirección de la velocidad de corriente máxima observada en Bahía Falsa durante condiciones de pleamar de (a) marea muerta y (b) marea viva.

numbered in increasing order starting from the southwestern border of the southern limit of FB (fig. 3).

The number of culture racks surveyed in the field was determined for each box. In general, each rack supports 120 strings and each string holds a variable number of individuals. The harvest is considered to be good when each string holds three dozen individuals, so this amount was selected to calculate the number of oysters per control box. An approximate total of 37.6 million individuals was calculated for FB. This amount was obtained by extrapolating the number of oysters per control box and the number of racks reported by oyster farmers in FB (Delgado-González 2010).

número de ostiones por caja control y el número de estantes reportados por los concesionarios del espacio acuícola en BF (Delgado-González 2010).

La profundidad de la zona es un factor determinante al utilizar estantes en el cultivo de ostión. Si los estantes se colocan a una profundidad de 1.5 m referido al nivel medio del mar, profundidad que coincide con la altura aproximada que tienen los estantes desde el fondo, cada vez que baje la marea se descubrirá una parte o toda la estructura con los ostiones, limitando la posibilidad de que éstos consigan alimento sólo en los tiempos de inmersión. Considerando que el máximo descenso de marea es alrededor de 1.4 m por

Water depth is an important factor when using oyster culture racks. If the racks are placed at 1.5 m depth relative to mean sea level, a depth that coincides with the approximate height of the racks from the bottom, every time the tide falls part or all of the structure will be exposed, limiting the feeding time available to oysters to when they are submerged. Considering that sea level falls a maximum of 1.4 m below mean sea level, in those areas in FB deeper than 2.5 m the racks are likely to remain underwater most of the time and the oysters will have access to food. Based on depth data relative to mean sea level, the following depth ranges were defined: 0–1, 1.01–1.5, 1.51–2, 2.01–2.5, and 2.51–3.0 m. The percentage of area corresponding to each depth range (DR) was obtained for each of the 15 boxes:

$$DR = \frac{\text{Depth range area}}{\text{Box area}} \quad (2)$$

To emphasize the relative importance of the five depth ranges proposed for the oyster farming area in FB, and given that the first depth range is the least recommended to reduce oyster growth time using the rack method, a numerical value was assigned to each depth range, with 1 corresponding to the lowest (0.0 to –1.0 m) and 5 to the deepest depth range (–2.51 to –3.0 m). This value was multiplied by the percent area of each box (Eq. 2) and normalized relative to the highest value found for the boxes to determine *DR_n*.

To analyze the distribution of POM in FB, the minimum and maximum values (0.7 ± 0.1 and 2.5 ± 0.2 mg L^{–1}) reported by García-Esquivel *et al.* (2004) were used. These authors assessed the ingestion and biodeposition rates of *C. gigas* from FB over periods of 6–8 h on four different occasions, and obtained ingestion rates ranging from 2.6 ± 0.4 to 3.9 ± 0.3 mg h^{–1}. In the present study, the hypothesis used to establish the distribution of POM among the boxes was that its behavior is passive and, consequently, its distribution depends on the hydrodynamic conditions. A percentage of this organic fraction is consumed by the oysters found in the corresponding box and a percentage is transported to contiguous areas to the north, east, and west, but the rest remains in the volume of water that elevates the level in the box when the tide rises. The net ingestion rate reported by García-Esquivel *et al.* (2004) refers to *C. gigas* organisms of commercial size (93 mm) and this rate was recorded even under conditions of greater POM concentrations. This ability to maintain similar ingestion rates regardless of the amount of food available is attributed to the physiological plasticity of *C. gigas*. Hence, the ingestion rate we used to estimate the distribution of POM was 3.9 ± 0.3 mg h^{–1}.

The amount of POM entering each box (*POM_{in}*) was obtained by multiplying the inflowing volume during the 6-h tidal cycle (*V_{in}*) by the organic fraction of the seston (POM):

$$POM_{in} = V_{in} \times POM \quad (3)$$

debajo del nivel medio del mar, los estantes instalados en aquellas zonas de la planicie en BF con una profundidad mayor a 2.5 m permanecerán sumergidos la mayor parte del tiempo, permitiendo un mayor acceso al alimento para los ostiones de los cultivos. Con base en los datos de la profundidad con relación al nivel medio del mar, se definieron los siguientes intervalos de profundidad: 0–1, 1.01–1.5, 1.51–2, 2.01–2.5 y 2.51–3.0 m. Para cada una de las 15 cajas se obtuvo el porcentaje de área en cada intervalo de profundidad (DR):

$$DR = \frac{\text{Área en intervalo de profundidad}}{\text{Área de caja}} \quad (2)$$

Con el propósito de resaltar la importancia relativa que tienen entre sí los cinco intervalos de profundidad propuestos en el área para el cultivo de ostión en BF, y dado que el intervalo con menor profundidad es el menos recomendado para reducir el tiempo de crecimiento del ostión empleando la técnica de estantes, se asoció un valor numérico unitario a cada intervalo de profundidad: 1 para el intervalo de menor profundidad (0.0 a –1.0 m) y 5 para el de mayor profundidad (–2.51 a –3.0 m). Este valor numérico se multiplicó por el porcentaje de área encontrado en cada caja (ecuación 2) y se normalizó con respecto al mayor valor numérico encontrado entre las cajas para determinar el *DR_n*.

Para analizar la distribución de POM en BF se utilizaron los valores mínimo y máximo (0.7 ± 0.1 y 2.5 ± 0.2 mg L^{–1}) reportados por García-Esquivel *et al.* (2004), quienes evaluaron las tasas de ingestión y biodeposición de *C. gigas* en BF utilizando mediciones de 6 a 8 h de duración, en cuatro ocasiones diferentes, y obtuvieron tasas de ingestión de 2.6 ± 0.4 a 3.9 ± 0.3 mg h^{–1}. En el presente trabajo, la hipótesis para establecer la forma en que POM se distribuye entre las cajas contempló el comportamiento pasivo de su distribución y, en consecuencia, que su distribución dependerá de las condiciones hidrodinámicas. Un porcentaje de esta fracción orgánica es consumida por los ostiones presentes en la caja correspondiente, otro porcentaje sale hacia las zonas contiguas al norte, este u oeste y el resto se retiene con el volumen que eleva el nivel de agua en la caja al subir la marea. La tasa de ingestión neta que reportan García-Esquivel *et al.* (2004) es para organismos de *C. gigas* con talla comercial (93 mm) y esta tasa la encontraron incluso en condiciones con mayores concentraciones de POM. Esta habilidad de mantener tasas de ingestión similares, independientemente de la concentración de alimento disponible, lo atribuyen a la plasticidad fisiológica de *C. gigas*, de ahí que la tasa de ingestión utilizada para estimar la distribución de POM haya sido 3.9 ± 0.3 mg h^{–1}.

La cantidad de POM que ingresa a cada caja (*POM_{in}*) se obtuvo multiplicando el volumen que entra durante las 6 h de marea (*V_{in}*) por la fracción orgánica del seston (POM):

$$POM_{in} = V_{in} \times POM \quad (3)$$

Consumption (*Con*) was obtained by multiplying the number of oysters (*Os*) found in each box by the ingestion ($Ing = 0.023 \text{ g } 6 \text{ h}^{-1}$) corresponding to each individual (García-Esquivel *et al.* 2004):

$$Con = Os \times Ing \quad (4)$$

A fraction of POM_{in} is associated with the volume that is retained and elevates the level of water in each box (V_a). This fraction (POM_a) is obtained by the difference between POM_{in} and *Con*, multiplied by the fraction between V_a and V_{in} :

$$POM_a = (POM_{in} - Con) \times \frac{V_a}{V_{in}} \quad (5)$$

where V_a is the difference between V_{in} and the outflowing volume (V_{out}). If there are no oysters in the box, the quantity of retained POM will be the product of POM_{in} times the fraction of V_a and V_{in} .

The amount of POM exiting a box (POM_{out}) is the difference between POM_{in} and *Con*, multiplied by the fraction of the volume exiting (V_{out}) relative to that entering the box (V_{in}):

$$POM_{out} = (POM_{in} - Con) \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (6)$$

The relation, per box, between POM_a and V_a yields the indicator of food availability (*IPOMd*), and it gives an idea of the changes in POM_{in} and, therefore, of the effect of the organisms as POM is distributed in the cultivation area. This indicator takes into account the hydrodynamics, POM ingestion by the total of oysters during the 6-h spring tide (approximately 0.9 t based on the ingestion rate of 3.9 mg L^{-1}), and the amount retained in the box forming part of the volume that makes the water level in the box rise:

$$IPOMd = \frac{POM_a}{V_a} \quad (7)$$

With the distribution of food per box (eq. 7), the BI (eq. 1) was obtained. This expression can be rewritten by making some algebraic substitutions based on the prior formulae, as follows:

$$BI = \left[POM - \frac{Os \times Ing}{V_{in}} \right] \times DRn \quad (8)$$

This expression shows that BI is a function of a component that relates the food and organisms recorded and another that incorporates normalized depth.

El consumo (*Con*) se obtuvo al multiplicar el número de ostiones (*Os*) que se encuentran en cada caja por la ingestión ($Ing = 0.023 \text{ g } 6 \text{ h}^{-1}$) que cada individuo realiza (García-Esquivel *et al.* 2004):

$$Con = Os \times Ing \quad (4)$$

El volumen que se retiene y hace subir el nivel del agua en cada caja (V_a) tiene asociada una fracción de POM_{in} . Esta fracción (POM_a) es la cantidad de POM retenido y resulta de obtener la diferencia entre POM_{in} y *Con*, multiplicada por la fracción entre V_a y V_{in} :

$$POM_a = (POM_{in} - Con) \times \frac{V_a}{V_{in}} \quad (5)$$

donde V_a es la diferencia entre V_{in} y el volumen que sale (V_{out}). Si en la caja no hay ostiones, la cantidad de POM retenido será el producto de POM_{in} por la fracción de V_a y V_{in} .

La cantidad de POM que sale de una caja (POM_{out}) es la diferencia de POM_{in} y el *Con*, multiplicada por la fracción de volumen que sale (V_{out}) con respecto al que entra en la caja (V_{in}):

$$POM_{out} = (POM_{in} - Con) \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (6)$$

La relación por caja de POM_a con respecto a V_a es el indicador de la distribución de alimento (*IPOMd*) y permite tener una idea de los cambios de POM_{in} y, por tanto, del efecto que tienen los organismos conforme la POM se distribuye en el área de cultivo. El *IPOMd* toma en cuenta la hidrodinámica, la ingestión que realizan el total de los ostiones durante las 6 h de marea llenante (aproximadamente 0.9 t si se usa la razón de consumo de 3.9 mg L^{-1}) y la cantidad que se retiene en la caja formando parte del volumen que hace que suba el nivel de agua en la caja:

$$IPOMd = \frac{POM_a}{V_a} \quad (7)$$

Con la distribución de alimento para cada caja (ecuación 7) se obtuvo BI (ecuación 1), expresión que puede reescribirse realizando algunas sustituciones algebraicas con las expresiones encontradas anteriormente para adquirir la siguiente forma:

$$BI = \left[POM - \frac{Os \times Ing}{V_{in}} \right] \times DRn \quad (8)$$

Esta expresión revela que BI está en función de una componente que relaciona el alimento y organismos contabilizados, y otra que incorpora la profundidad normalizada.

RESULTS

The velocity field obtained by modelling the flux of the inflowing spring tide selected showed that the internal tidal delta contributed to reduce water velocity over the shallowest part and to maintain higher water velocities through the channels that define the eastern and western limits of the delta (fig. 4). The water inundating FB follows the bottom contours and the following characteristics were defined: the water reaching the innermost area (head) of FB flows through the eastern channel; the water flowing through the western channel does so at the same velocity as through the eastern channel but only reaches the middle part of FB due to the scant channel depth; the eastern and western channels have smaller branches that distribute the flow to the central part of FB, where a convergence zone is formed when the waters meet; and more water is incorporated through the eastern channel than through the western, generating a zone of eddy-type circulation in the second half of the western side of FB (fig. 4).

Tidal inflow incorporates the greatest volume of water to FB through boxes 1 and 3, where the secondary channels begin. Box 2 receives more water through its east side than through its south side because of the lesser depth on this side, as shown by the bathymetry (fig. 1). Bathymetry in this region allows the identification of troughs in box 2.

The results of the hydrodynamic model revealed the volume exchanges among boxes. In box 1, for example, $4.67 \times 10^6 \text{ m}^3$ enter on the south side and $0.14 \times 10^6 \text{ m}^3$ enter on the east side, while $2.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ exit on the north side and $0.27 \times 10^6 \text{ m}^3$ exit on the east side. The difference between V_{in} and V_{out} represents the volume that is retained and elevates the level of water in the box: $V_a = 2.25 \times 10^6 \text{ m}^3$. The respective volumes for each box are shown in table 1. These values were used to calculate the distribution of POM, the main constituent of the oyster's diet.

When the neap tide condition was combined with a POM value of 0.7 mg L^{-1} , the *IPOMd* obtained under this scenario (fig. 5) was considered the least favourable scenario given the way the concentration of food decreased since it entered (first three boxes) until it reached the head of FB (box 15; table 2). Consumption in seven of the boxes was of the same order of magnitude as the value obtained by *IPOMd*.

When the spring tide condition was considered with a POM concentration of 2.5 mg L^{-1} (fig. 5), the initial POM concentrations were one order of magnitude higher than consumption in all the boxes, and in some boxes it was two orders of magnitude higher (table 2). The *IPOMd* values increased significantly relative to the neap tide condition, indicating greater food availability, exceeding the expected consumption.

The spatial distribution of *DRn* in FB (fig. 6) showed that boxes 5, 8, and 9 had the highest proportions for the proposed cultivation depths. Boxes 3 and 11 had the lowest and least favourable proportions, the former because of the bottom

RESULTADOS

El campo de velocidades que se obtuvo al modelar el flujo de la marea alta entrante seleccionado permitió observar la participación del delta interno de marea en reducir la velocidad del agua que pasa por su parte menos profunda y mantener mayores velocidades del agua que fluye por los canales que definen los límites este y oeste del delta (fig. 4). El volumen de agua que inunda la planicie de BF sigue los contornos del fondo y se distinguen las siguientes características principales: a través del canal este fluye el agua que más logra penetrar en la zona de la cabeza de BF; el canal oeste incorpora agua con velocidad similar al canal este, mas sólo alcanza la parte media de BF, debido a la poca profundidad con que discurre su cauce; los canales este y oeste tienen ramificaciones de menores dimensiones que distribuyen el flujo de agua hacia la parte central de BF, formando en este encuentro de parcelas de agua una zona de convergencia; y la predominancia del canal este en la incorporación de agua sobre el oeste genera una zona de circulación, formando un giro en la segunda mitad del costado oeste de BF (fig. 4).

Los flujos de la marea entrante incorporan el principal volumen de agua a BF por las cajas 1 y 3, las cuales enmarcan el inicio de los canales secundarios. La caja 2 recibe mayor volumen por su frontera este que por su frontera sur debido a la menor profundidad en esta frontera, tal como se puede apreciar por la batimetría mostrada en la figura 1. Esta batimetría permite identificar la zona de bajos en la caja 2.

Los intercambios de volumen entre las cajas se obtuvieron a partir de los resultados del modelo hidrodinámico. Por ejemplo, en la caja 1 entran $4.67 \times 10^6 \text{ m}^3$ por la frontera sur y $0.14 \times 10^6 \text{ m}^3$ por la frontera este, mientras que por la frontera norte salen $2.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ y por la frontera este salen $0.27 \times 10^6 \text{ m}^3$. La diferencia entre V_{in} y V_{out} representa el volumen que se retiene y eleva el nivel de agua en la caja: $V_a = 2.25 \times 10^6 \text{ m}^3$. Los volúmenes respectivos para cada una de las cajas se presentan en la tabla 1. La distribución de POM, principal constituyente de la dieta de los ostiones, se calculó a partir de estos valores.

Al combinar la condición de marea muerta con un valor de POM de 0.7 mg L^{-1} , la *IPOMd* obtenida bajo este escenario (fig. 5) puede considerarse como el escenario menos favorable, dada la forma en que disminuye la concentración de alimento desde su ingreso en las primeras tres cajas hasta llegar a la cabeza de BF (caja 15; tabla 2). El consumo en siete de las cajas es del mismo orden de magnitud que el valor obtenido por *IPOMd*.

Cuando se consideró la condición de marea viva, al incluir una concentración de POM de 2.5 mg L^{-1} (fig. 5), las concentraciones iniciales de POM fueron de hasta un orden de magnitud mayor que el consumo en todas las cajas y en algunas pudo ser de hasta dos órdenes mayor (tabla 2). Los valores de *IPOMd* se incrementaron significativamente con respecto a la situación de marea muerta, indicando una

Table 1. Volumes that enter (V_{in}), exit (V_{out}), and raise the level of water in the boxes (V_a) under two conditions in Falsa Bay. The area of each box used during the calculations is also given.

Tabla 1. Volúmenes que entran (V_{in}), salen (V_{out}) y elevan el nivel del agua en las cajas (V_a) bajo dos condiciones de marea en Bahía Falsa. Se presenta también la extensión superficial de cada una de las cajas utilizadas durante los cálculos.

Box	Area (ha)	Spring tide condition			Neap tide condition		
		$V_{in} \times 10^6 \text{ m}^3$	$V_{out} \times 10^6 \text{ m}^3$	$V_a \times 10^6 \text{ m}^3$	$V_{in} \times 10^6 \text{ m}^3$	$V_{out} \times 10^6 \text{ m}^3$	$V_a \times 10^6 \text{ m}^3$
1	198	4.81	2.56	2.25	2.83	2.04	0.78
2	139	2.64	1.78	0.86	1.31	0.78	0.53
3	49	9.11	7.47	1.64	1.64	1.22	0.42
4	110	2.45	1.16	1.29	1.65	1.07	0.58
5	78	2.93	1.51	1.42	1.11	0.69	0.42
6	33	5.64	4.89	0.74	0.86	0.77	0.08
7	67	0.90	0.21	0.69	0.53	0.26	0.27
8	56	1.66	0.83	0.82	0.57	0.36	0.20
9	76	3.53	2.52	1.01	0.88	0.59	0.28
10	32	3.68	3.54	0.14	0.55	0.44	0.10
11	34	0.32	0.032	0.28	0.18	0.04	0.14
12	50	1.20	0.49	0.71	0.42	0.23	0.18
13	56	1.80	1.04	0.75	0.53	0.32	0.21
14	66	1.36	1.00	0.35	0.30	0.16	0.14
15	190	1.33	0.00	1.33	0.53	0.00	0.53

Table 2. Balance of particulate organic material inflow (POM_{in}), consumption, retention (POM_a), outflow (POM_{out}), and distribution ($IPOMd$) in Falsa Bay during the 6-h tidal cycles used.

Tabla 2. Balance del ingreso (POM_{in}), consumo, retención (POM_a), salida (POM_{out}) y distribución ($IPOMd$) de la materia orgánica particulada en Bahía Falsa durante las 6 h que duran las condiciones de marea utilizadas.

Box	Number of racks	$POM_{in} \times 10^6 \text{ g}$		Net ingestion (g m^{-3})	$POM_a \times 10^6 \text{ g}$		$POM_{out} \times 10^6 \text{ g}$		$IPOMd$	
		Neap tide	Spring tide		Neap tide	Spring tide	Neap tide	Spring tide	Neap tide 0.7 mg L^{-1}	Spring tide 2.5 mg L^{-1}
1	275	1.98	12.02	0.01	0.54	5.61	1.41	6.38	0.69	2.49
2	365	0.92	6.61	0.04	0.36	2.14	0.52	4.42	0.67	2.49
3		1.15	22.78	0.00	0.29	4.10	0.85	18.68	0.70	2.50
4	2000	1.14	6.12	0.16	0.33	3.11	0.61	2.80	0.57	2.41
5	2000	0.73	7.31	0.14	0.20	3.44	0.33	3.67	0.47	2.42
6		0.60	14.10	0.00	0.06	1.86	0.54	12.24	0.70	2.50
7		0.30	2.16	0.00	0.15	1.66	0.15	0.51	0.56	2.40
8	800	0.30	4.03	0.10	0.08	1.95	0.14	2.00	0.39	2.38
9	980	0.44	8.71	0.10	0.11	2.46	0.23	6.14	0.39	2.44
10	180	0.39	9.20	0.13	0.07	0.35	0.30	8.83	0.67	2.50
11		0.10	0.77	0.00	0.08	0.69	0.02	0.08	0.52	2.39
12		0.15	2.89	0.00	0.07	1.70	0.08	1.19	0.36	2.39
13	750	0.22	4.41	0.10	0.06	1.82	0.09	2.51	0.26	2.40
14	320	0.20	3.39	0.09	0.08	0.88	0.09	2.48	0.56	2.47
15	1310	0.20	3.24	0.10	0.07	3.11	0.00	0.00	0.12	2.33

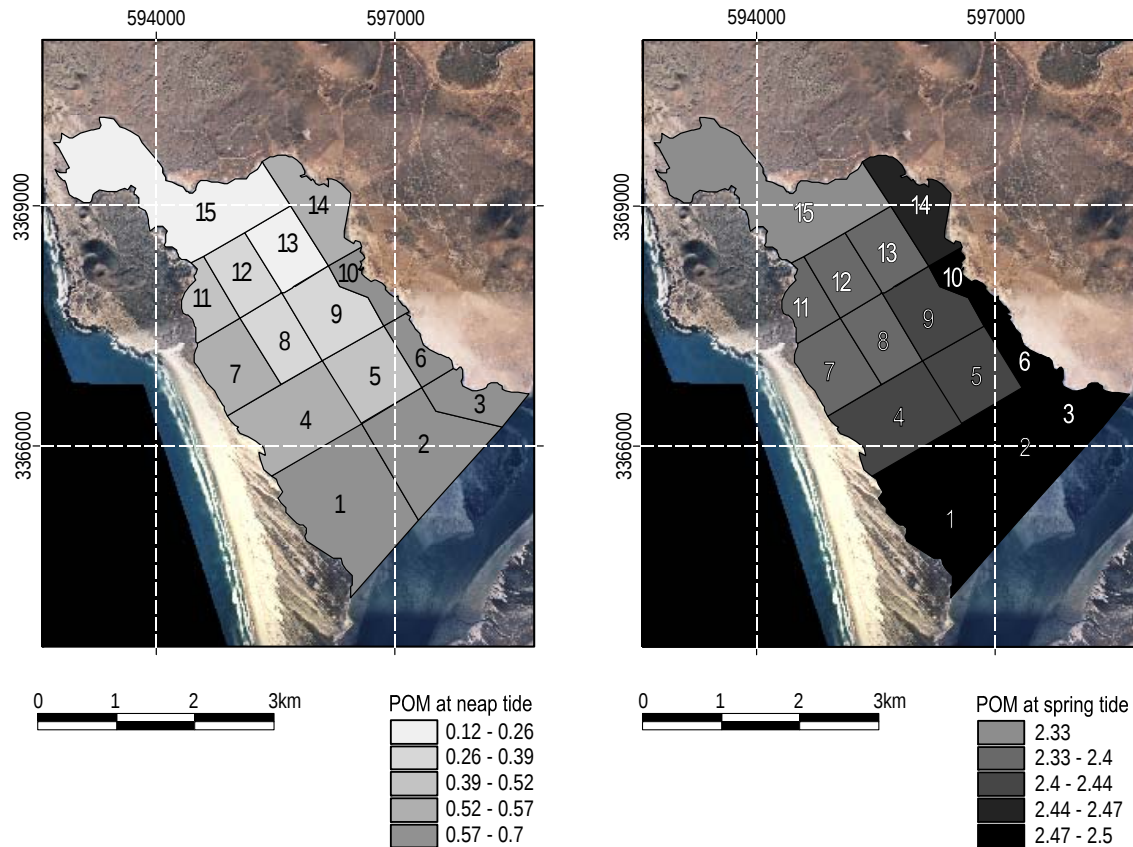


Figure 5. Distribution of particulate organic material (POM) in Falsa Bay (*IPOMd*). Initial POM concentration was 0.7 mg L^{-1} for the neap tide condition (a) and 2.5 mg L^{-1} for the spring tide condition (b). The figure shows a natural classification based on the Jenks optimization method, which minimizes the sum of the variance in each class. Box numbers are indicated.

Figura 5. Distribución de la materia orgánica particulada (POM) en Bahía Falsa (*IPOMd*). Para la condición de marea muerta (a) la concentración inicial de POM fue de 0.7 mg L^{-1} y para la condición de viva (b) fue de 2.5 mg L^{-1} . La figura presenta una clasificación natural basada en el método de optimización de Jenks, el cual minimiza la suma de la varianza en cada clase. Se indica el número de cajas.

slope of the eastern channel and the latter because of the scant depth (fig. 6). Note that depths in the eastern channel (boxes 3 and 6) range from 2 to 3 m; however, these depths form part of the slope and are unsuitable for placing racks and, consequently, their percentage is zero in some boxes (table 3).

Normalization of the BI relative to the highest value found in the boxes during spring tide enabled the identification of the spatial distribution. Considering that the food concentration used for spring tide was higher than that used for neap tide, this normalization accounts for this difference. The best culture sites are found on the western side (boxes 1, 4, and 5) during neap tide and in the central part (boxes 5, 8, and 9) during spring tide. A higher classification scale for BI (fig. 7) was obtained for spring tide than for neap tide, which can be interpreted as better conditions for all of FB (fig. 7).

DISCUSSION

The approximation used to evaluate the aquacultural potential of FB using the volume associated with the

mayor disponibilidad de alimento y excediendo el consumo esperado.

La distribución espacial de *DRn* en BF (fig. 6) muestra que las cajas 5, 8 y 9 presentan las mayores proporciones de profundidad propuestas como favorables para el cultivo y las cajas 3 y 11 las proporciones más bajas y menos favorables. En la caja 3 las pendientes del cauce del canal este determinan la baja viabilidad de cultivo, mientras que en la caja 11 lo determina la escasa profundidad (fig. 6). Es conveniente señalar que las profundidades del canal este (cajas 3 y 6) se encuentran dentro del intervalo de 2 a 3 m; sin embargo, éstas profundidades forman parte de la pendiente del cauce y son inapropiadas para colocar los estantes, lo cual explica el porcentaje de cero en algunas cajas (tabla 3).

La normalización de BI con respecto al mayor valor encontrado en las cajas durante marea viva permite identificar su distribución espacial. Teniendo en cuenta que la concentración de alimento utilizada para marea viva fue mayor que la concentración utilizada para marea muerta, esta normalización reposiciona la diferencia de concentraciones. Se observa cómo los mejores sitios de cultivo en marea

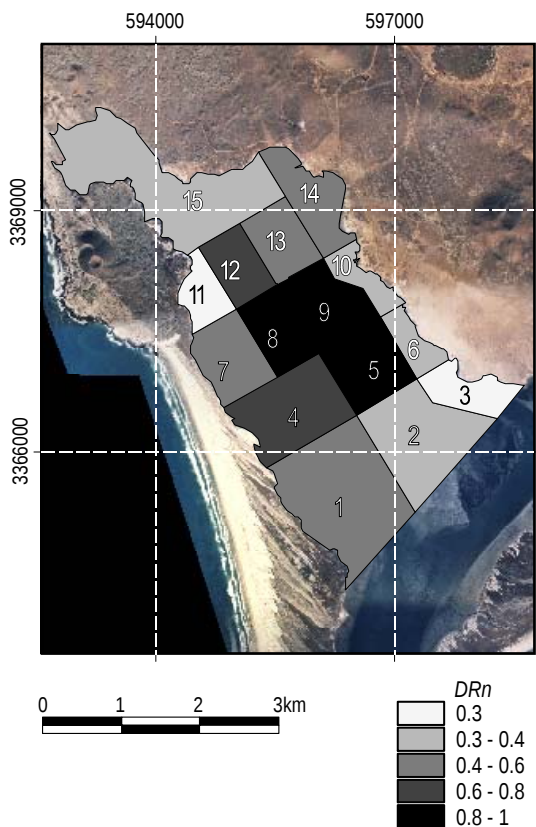


Figure 6. Normalized depth distribution obtained in Falsa Bay according to the ranges proposed (DRn).

Figura 6. Distribución de profundidad normalizada obtenida en Bahía Falsa de acuerdo con los intervalos propuestos (DRn).

tide-induced hydrodynamic component is directly related to the food carried inward and to the elevation of the water level in the interior. The hydrodynamics derived from the numerical model (MIKE 21) indicated the role the channels play in transporting water to FB under spring and neap tide conditions. During the neap tide selected, the channel on the western side of FB (box 1) incorporated a greater volume of water than the channel on the eastern side (box 3), whereas the opposite occurred during spring tide (table 1, fig. 4).

The initial POM concentration associated with the initial volume and the effect of organism distribution and ingestion were key elements for classifying the aquacultural spaces in this study (Eq. 8). Though the number and arrangement of the boxes can be modified, the spatial distribution of POM should be similar to that obtained using the 15 boxes and the hydrodynamic model, since the concentration of POM_a was up to two orders of magnitude higher than consumption in the spring tide scenario and initial concentration of 2.5 mg L^{-1} .

The consumption of POM in each box reflected the density of organisms cultivated per cubic meter. In the higher density zones (boxes 4 and 5), the cultivated organisms would consume 30% of the total POM in FB (table 2). However, total consumption by the 37.6 million cultivated oysters of the POM incorporated during neap tide (3.45 t), at

muerta se ubican en el lado oeste (cajas 1, 4 y 5; fig. 7), mientras que en mareas vivas se ubican en la parte central (cajas 5, 8 y 9). La escala de valores (fig. 7) en marea viva es mayor que en marea muerta, lo cual puede interpretarse como mejores condiciones para toda BF.

DISCUSIÓN

La aproximación utilizada para evaluar el potencial acuícola de BF empleando el volumen asociado a la componente hidrodinámica inducida por la marea está directamente relacionada con el alimento que se incorpora y con la elevación del nivel de agua en su interior. La hidrodinámica obtenida empleando el modelo numérico (MIKE 21) permitió distinguir el papel de los canales en el llenado de BF en condiciones de una marea viva y una muerta. En la condición de la marea muerta seleccionada el canal que discurre por el lado oeste de BF (caja 1) incorpora mayor volumen que el canal este (caja 3), mientras que en la condición de marea viva ocurre lo contrario (tabla 1, fig. 4).

La concentración inicial de POM asociada al volumen inicial y el efecto que tiene la distribución e ingestión de organismos fueron factores determinantes para la calificación del espacio acuícola de este trabajo (ecuación 8). Aunque el número y la disposición de las cajas podrían modificarse, es de esperar que la distribución espacial de POM sea similar a la obtenida empleando las 15 cajas y el modelo hidrodinámico, ya que la concentración POM_a es hasta dos órdenes de magnitud mayor que el consumo en el escenario de condiciones de marea viva, cuya concentración inicial fue de 2.5 mg L^{-1} .

El consumo de POM en cada caja reflejó la densidad de organismos cultivados por metro cúbico. En las zonas de mayor densidad (cajas 4 y 5) los organismos cultivados consumirían 30% del total de POM en BF (tabla 2). Sin embargo, de la POM incorporada durante la marea muerta (3.45 t), el consumo total que realizarían los 37.6 millones de ostiones cultivados, a razón de 0.023 g h^{-1} , sería de 0.9 t, es decir, se consumiría solamente 26% del alimento disponible, distribuyéndose las 2.5 t restantes en el cuerpo de agua. Este porcentaje de consumo se reduciría a 3% si se considera el escenario de marea viva, en el cual se introducen aproximadamente 36 t. Este último porcentaje es del orden de magnitud de los valores reportados por Banas *et al.* (2006), quienes dan valores de consumo entre 8% y 15% del fitoplancton neto incorporado por la marea. Estas estimaciones permiten sugerir que aun bajo las condiciones menos favorables asociadas con marea muerta y la concentración inicial utilizada, la cantidad indicada de ostiones en cultivo dispondría de alimento suficiente para soportar al cambio de marea viva.

García-Esquivel *et al.* (2004) estimaron que la capacidad de carga ostrícola de BF se encuentra entre 1913 y 5979 t, considerando individuos con peso promedio de 52.2 g; las cantidades representan aproximadamente 36 y 114 millones de ostiones, respectivamente. Mientras que el consumo

Table 3. Proportion of area within each depth range in each box. The sum of this proportion (DR) times the associated weight allows a classification and normalization relative to the high value obtained from this classification.**Tabla 3.** Proporción de área que cada intervalo de profundidad presenta en cada caja. La suma de esta proporción (DR) por el peso asociado permite clasificar y normalizar con respecto al mayor valor obtenido de esta clasificación.

Box	Depth range (m) and weight []					Σ (DR $\times$ weight)	DRn
	0–1 [1]	1.01–1.5 [2]	1.51–2 [3]	2.01–2.5 [4]	2.51–3.0 [5]		
1	0.33	0.27	0.14	0.06	0.06	1.83	0.6
2	0.79	0.15	0.04	0.01	0.00	1.29	0.4
3	0.26	0.12	0.06	0.05	0.00	0.91	0.3
4	0.10	0.68	0.15	0.05	0.03	2.25	0.7
5	0.01	0.33	0.63	0.04	0.00	2.72	0.9
6	0.12	0.08	0.12	0.09	0.05	1.27	0.4
7	0.29	0.65	0.09	0.02	0.00	1.95	0.6
8	0.00	0.12	0.84	0.01	0.00	2.80	0.9
9	0.00	0.04	0.67	0.16	0.07	3.07	1.0
10	0.00	0.03	0.04	0.11	0.14	1.31	0.4
11	0.07	0.40	0.01	0.00	0.00	0.89	0.3
12	0.00	0.34	0.62	0.00	0.00	2.55	0.8
13	0.44	0.46	0.06	0.01	0.00	1.56	0.5
14	0.38	0.14	0.13	0.12	0.01	1.56	0.5
15	0.47	0.22	0.03	0.03	0.01	1.16	0.4

a rate of $0.023 \text{ g } 6 \text{ h}^{-1}$, would be 0.9 t ; that is, only 26% of the available food would be consumed and the remaining 2.5 t would be distributed throughout the water body. This percentage of consumption would decrease to 3% in the spring tide scenario, when approximately 36 t are introduced. This last percentage is of the same order of magnitude as the consumption values of 8–15% of net tide-incorporated phytoplankton reported by Banas *et al.* (2006). These estimates indicate that even under less favourable conditions associated with neap tide and the initial concentration used, the oysters would have sufficient food to withstand the tidal change.

According to García-Esquivel *et al.* (2004), the carrying capacity of oyster aquaculture in FB is between 1913 and 5979 t, considering individuals that weigh approximately 52.2 g; these amounts represent about 36 and 114 million oysters, respectively. The consumption associated with 36 million individuals is similar to that estimated for the amount of cultivated oysters and, hence, they would have enough food during neap tide conditions. On the other hand, 114 million individuals would consume approximately 2.6 t , that is, 75% of the amount introduced by this tide, a compromising percentage for the cultivation and subsistence of other species that occupy the same space and compete for the same type of food. The spring tide, however, with an initial concentration of 2.5 mg L^{-1} , incorporates approximately 36 t , and

realizado por los 36 millones de ostiones es similar al estimado para la cantidad de ostiones en cultivo y, por tanto, dispondrían de suficiente alimento en condiciones de marea muerta, los 114 millones de individuos consumirían aproximadamente 2.6 t , es decir, 75% de la concentración que introduce esta marea, un porcentaje comprometedor para lograr el cultivo y la subsistencia de otras especies que ocupan el mismo espacio y que compiten por el mismo tipo de alimento. Sin embargo, la condición de marea viva con una concentración inicial de 2.5 mg L^{-1} incorpora aproximadamente 36 t , y el consumo que realizarían los más de 100 millones de organismos representa sólo 7% de esta cantidad que se incorpora, lo cual refleja la importancia de la combinación del estado de la marea con las concentraciones de POM.

Para las condiciones de marea muerta y viva, los valores de *IPOMd* disminuyeron hacia la cabeza de BF (tabla 2, fig. 5). Las cajas 1, 2, 3, 6 y 10 mantuvieron valores similares a las concentraciones iniciales, las tres últimas principalmente por estar ubicadas en el cauce del canal este, en el cual se dificulta la colocación y mantenimiento de estantes. Independientemente de esta distribución se debe tomar en cuenta que para valores absolutos la diferencia de una celda a otra es pequeña y, en cualquier caso, excede los valores mínimos requeridos. Esta no limitación por disponibilidad de alimento hace que el factor profundidad

consumption by more than 100 million organisms represents only 7% of the amount incorporated; this reflects the importance of combining tidal condition and the concentrations of the organic fraction of the seston.

Under neap and spring tide conditions, the *IPOMd* values decrease towards the head of FB (table 2, fig. 5). Boxes 1, 2, 3, 6, and 10 showed similar values as the initial concentrations, the last three mainly because of their location in the eastern channel where it is difficult to place and maintain racks. Regardless of this distribution, one should consider that in the case of absolute values the difference from one cell to another is small and exceeds the minimum values required. Because of this non-limitation of food availability, the relative importance of the depth factor increases in terms of the definition of productive microregions, such that it could be considered the predominant factor under current conditions.

Based on *DRn*, on comparing the boxes in relative terms, eight boxes were found to have conditions with half the characteristics of the best classified box. Boxes 4, 5, 7, 8, and 9 (second and third rows), as well as box 12 (fourth row) were the best classified. The third row comprised the largest area with suitable conditions for oyster farming using the rack method, while the first, fourth, and fifth rows comprised the least proportional area (fig. 6). The incorporation of *DRn* allowed us to compare the characteristics of each box and recognize that there are differences in space use that must be considered to improve the efficiency of farming operations. For example, search for an equilibrium that could reduce the height of the racks without affecting yield or change the culture method.

The time difference shown by the growth curves for organisms located at the head and mouth (García-Esquivel *et al.* 2000) corresponds to the BI classification for boxes 15 and 5, with values of 0.02 and 0.17, respectively, under neap tide condition, and of 0.36 and 0.88, respectively, under spring tide condition (fig. 7). Though food availability and depth during neap tide contribute to the low BI values, during spring tide depth determines the evaluation given the *IPOMd* values, suggesting that culture depth is the factor characterizing or determining the microregions in FB.

In addition to the role played by the hydrodynamic conditions and the cultured filter-feeding bivalves in the distribution of phytoplankton in FB, it is necessary to consider the possible effect caused by the presence of farms. These farms can act as barriers and locally alter the water circulation, which could lead to the accumulation of organic matter at those sites with the largest number of racks, as suggested by the distribution of muddy sediments in the central part of FB (Daesslé *et al.* 2009), or the particular spatial distribution of phytoplankton within the cultivation sites, according to the position, orientation, and depth of the culture (Gillibrand and Turrell 1997). Food-availability conditions are likely better at culture sites located near the main and secondary channels, in

amente su importancia relativa en cuanto a la definición de microregiones productivas, de tal forma que podría considerarse como el factor predominante en las condiciones actuales.

De acuerdo con el *DRn*, al comparar las cajas, las condiciones de ocho cajas disponen de menos de la mitad de las características de la caja mejor calificada. Las cajas que se encuentran en la segunda y la tercera franja (4, 5, 7, 8 y 9), así como la caja 12 en la cuarta franja, son las mejor evaluadas. La zona que define la tercera franja dispone de mayor área con condiciones apropiadas para el cultivo empleando la técnica de estantes, mientras que las zonas definidas por la primera, cuarta y quinta franjas presentan menos área proporcional (fig. 6). La incorporación de *DRn* permitió comparar las características que tiene cada caja y reconocer que existen diferencias que deben ser consideradas en el uso del espacio para volver más eficiente las prácticas del cultivo; por ejemplo, buscar un equilibrio que permita reducir la altura de los estantes pero que siga siendo redituable su mantenimiento o cambiar la técnica de cultivo.

La diferencia en tiempo mostrada en las curvas de crecimiento por organismos localizados en la cabeza y boca (García-Esquivel *et al.* 2000) corresponden a la clasificación de BI de las cajas 15 y 5, cuyos valores son de 0.02 y 0.17, respectivamente, en condición de marea muerta, y 0.36 y 0.88, respectivamente, en marea viva (fig. 7). Mientras que la distribución del alimento y la profundidad en la condición de marea muerta contribuyen a los valores bajos de BI, en marea viva la profundidad determina la valoración dados los valores de *IPOMd*, lo cual sugiere que la profundidad de instalación es el factor que caracteriza o determina las microregiones de BF señaladas por estos autores.

Además del papel que determina la hidrodinámica y el filtrado de los bivalvos cultivados en la distribución del fitoplancton en BF, habría que considerar el posible efecto ocasionado por la presencia de las granjas. Estas granjas pueden funcionar como barreras y alterar localmente la circulación de agua, lo cual podría generar acumulación de materia orgánica en los espacios con mayor cantidad de estantes, como lo sugiere la distribución de lodos en la parte central de BF (Daesslé *et al.* 2009), o distribuciones espaciales particulares de fitoplancton dentro de la zona de cultivos, de acuerdo con la posición, orientación y profundidad del cultivo (Gillibrand y Turrell 1997). Se esperaría que aquellos cultivos próximos al canal principal y a los secundarios, colocados en planicies con profundidades de 2.5 m o más, estarían en mejores condiciones de disponibilidad de alimento, ya que estarían expuestos a los flujos generados por la marea entrante por más tiempo que aquellos alejados de éste y con profundidad menor a la indicada. Sin embargo, se desconocen los efectos particulares que tienen los cultivos en la distribución natural sedimentos y del alimento, situación que tendrá que ser atendida con mediciones y modelos hidrodinámicos con mayor capacidad espacial resolutive.

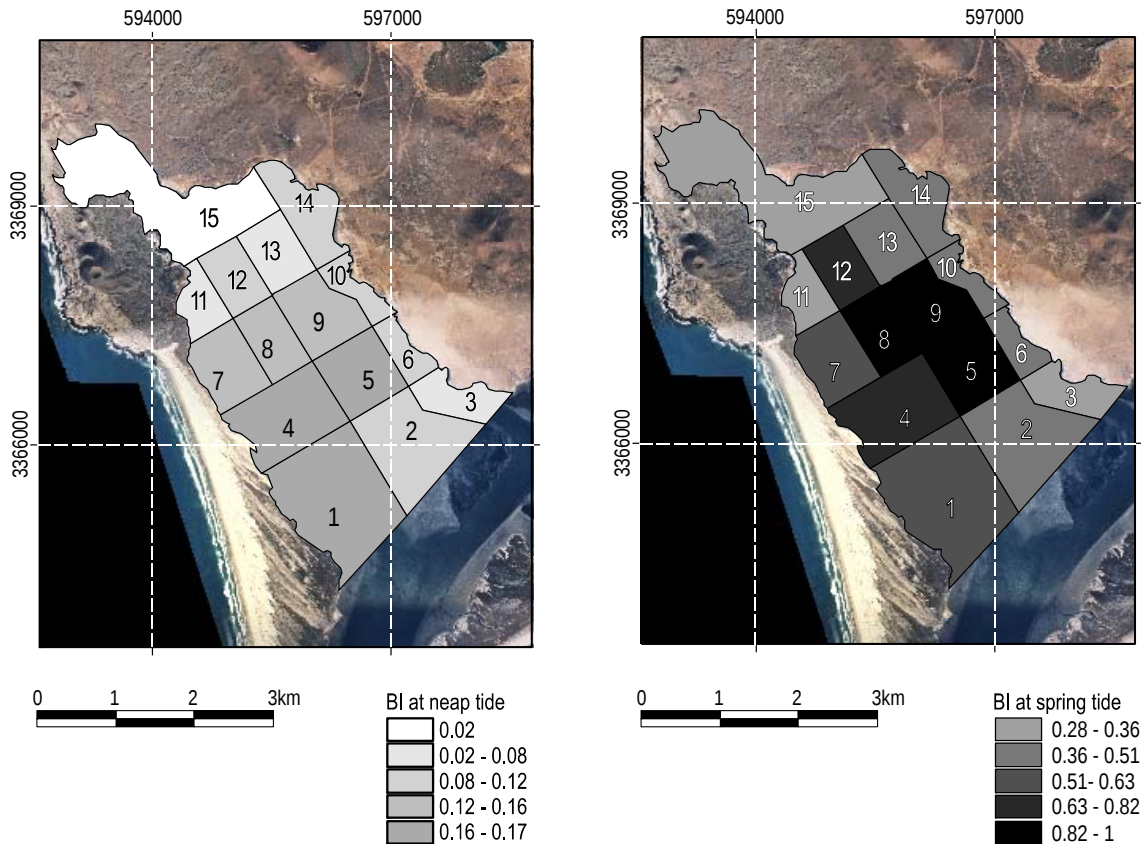


Figure 7. Distribution of the biophysical index (BI) classification for Falsa Bay.

Figura 7. Distribución del indicador biofísico (BI) clasificado para Bahía Falsa.

tidal flats of 2.5 m depth or more, since they are exposed to currents generated by the inflowing tide for longer periods of time than the shallower or more-distant sites. Nevertheless, the particular effects of cultures on the natural distribution of sediments and food are not known, and this situation needs to be addressed using measurements and hydrodynamic models of higher spatial resolution.

The five boxes with the best BI classification were 4, 5, 8, 9, and 12 (fig. 7). The first four coincide with the sites containing the largest number of culture racks. Their better BI classification can be attributed to depth, which allows the racks to remain under water most of the time, as well as to their position relative to the tidal fluxes and to the new food they incorporate from the Pacific Ocean.

The BI created to classify the viability of lagoon environments and applied to FB indicates that the differences observed in the time organisms take to attain their commercial size of 0.09 m are associated with the exposure time imposed by the depth of the culture site, since food availability estimated for neap and spring tide conditions exceeds the nutritional requirements. The index, using food availability and depth as indicators, characterizes the different biophysical conditions for oyster farming operations throughout FB, from which it is possible to identify the optimal culture areas (fig. 7) and plan future development.

Las cinco cajas con mejor clasificación BI, fueron las cajas 4, 5, 8, 9 y 12 (fig. 7). Las primeras cuatro coinciden con los espacios que albergan las concesiones con mayor número de estantes instalados. Los mejores valores de BI en estas áreas de cultivo, en principio, pueden atribuirse a la profundidad, que permite mantener los estantes bajo el agua la mayor cantidad del tiempo, así como a la posición relativa que guardan los estantes con respecto a los cauces de los canales a través de los cuales fluyen los principales flujos de marea y con ello el alimento nuevo que se incorpora del Pacífico.

La aplicación del índice para valorar la viabilidad de ambientes lagunares aquí desarrollado y aplicado en BF, indica que para este ambiente lagunar, las diferencias observadas en el tiempo que tardan los organismos en alcanzar su talla comercial de 0.09 m están asociadas con el tiempo de exposición impuesto por la profundidad del área de cultivo, dado que la disponibilidad de alimento estimada con escenarios de marea muerta y marea viva supera las exigencias alimenticias. El producto del indicador de la distribución de alimento con el de profundidad permite obtener un índice que caracteriza el estado biofísico para el desarrollo acuícola del ostión de forma diferenciada a lo largo de la BF, con lo cual se logran identificar las zonas óptimas para la explotación (fig. 7) pudiendo ser utilizada para planificar desarrollos futuros.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author acknowledges receipt of a doctoral scholarship from the Mexican Council for Science and Technology. This study was supported by an internal research grant from the Autonomous University of Baja California. The anonymous reviewers offered helpful suggestions and comments.

English translation by Christine Harris.

REFERENCES

- Aguirre-Muñoz A, Buddemeier RW, Camacho-Ibar V, Carriquiry JD, Ibarra-Obando SE, Massey BW, Smith S, Wulff F. 2001. Sustainability of coastal resource use in San Quintín, Mexico. *Ambio* 30: 142–149.
- Álvarez-Borrego J, Álvarez-Borrego S. 1982. Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Rep.* 23: 188–197.
- Angulo-Larios NT. 2006. Hidrodinámica de la Bahía de San Quintín, Baja California. M.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, 128 pp.
- Aveytua-Alcázar L. 2008. Modelación de la dinámica biogeoquímica en una laguna costera. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, 219 pp.
- Aveytua-Alcázar L, Camacho-Ibar VF, Souza AJ, Allen JI, Torres R. 2008. Modelling *Zostera marina* and *Ulva* spp. in a coastal lagoon. *Ecol. Model.* 218: 354–366.
- Banas NS, Hickey BM, Newton JA, Ruesink JL. 2007. Tidal exchange, bivalve grazing, and patterns of primary production in Willapa Bay, Washington, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 341: 123–139.
- Camacho-Ibar V, Carriquiry JD, Smith S. 2003. Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintín Bay, Mexico. *Estuaries* 26: 1220–1237.
- Chávez-de-Nishikawa AG, Álvarez-Borrego S. 1974. Hidrología de la Bahía de San Quintín, Baja California, en invierno y primavera. *Cienc. Mar.* 1: 31–62.
- Daesslé LW, Rendón-Márquez G, Camacho-Ibar VF, Gutiérrez-Galindo EA, Shumilin E, Ortiz-Campos E. 2009. Geochemistry of modern sediments from San Quintín coastal lagoon, Baja California: Implication for provenance. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 26: 117–132.
- Del-Valle-Lucero I. 1979. Aplicaciones de un modelo numérico y análisis de condiciones hidrodinámicas en Bahía San Quintín, BC, México. M.Sc. thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Mexico, 36 pp.
- Delgado-González O. 2010. Desarrollo y aplicación de una herramienta de gestión para el aprovechamiento acuícola en Bahía San Quintín, Baja California. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 182 pp.
- DHI. 2008. Hydrodynamic module (HD), <http://www.dhigroup.com>.
- FAO. 2009. The State of World Fisheries and Aquaculture 2008. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Rome, 107 pp.
- Flores-Vidal X. 2006. Circulación residual en Bahía San Quintín, BC, México. M.Sc. thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 91 pp.
- García-Esquivel Z, González-Gómez MA, Ley-Lou F, Mejía-Trejo A. 2000. Microgeographic differences in growth, mortality, and

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo económico brindado por CONACYT. A la UABC el apoyo económico recibido a través de la decimocuarta convocatoria interna a proyectos de investigación. A los revisores anónimos por las sugerencias y comentarios emitidos al presente trabajo.

- biochemical composition of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) from San Quintín Bay, Mexico. *J. Shellfish Res.* 19: 789–797.
- García-Esquivel Z, González-Gómez MA, Ley-Lou F, Mejía-Trejo A. 2004. Oyster culture potential in the west arm of San Quintín Bay: Current biomass and preliminary estimate of the carrying capacity. *Cienc. Mar.* 30: 61–74.
- Gillibrand PA, Turrell WR. 1997. The use of simple models in the regulation of the impact of fish farms on water quality in Scottish sea lochs. *Aquaculture* 159: 33–46.
- Héral M, Deslous-Paoli JM. 1991. Oyster culture in European countries. In: Menzel W (ed.), *Estuarine and Marine Bivalve Mollusk Culture*. CRC Press, Florida, pp. 154–186.
- Hernández-Ayón M, Galindo-Bect MS, Camacho-Ibar VF, García-Esquivel Z, González-Gómez MA, Ley-Lou F. 2004. Nutrient dynamics in the west arm of San Quintín Bay, Baja California, Mexico, during and after El Niño 1997/98. *Cienc. Mar.* 30: 119–132.
- Hernández-Ayón JM, Camacho-Ibar VF, Mejía-Trejo A, Cabello-Pasini A. 2007. Variabilidad del CO₂ total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, Baja California, México. In: Hernández de la Torre B, Gaxiola-Castro G (eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. DF SEMARNAT-INECICESE, Mexico, pp. 187–200.
- Lara-Espinoza A. 2007. Variabilidad espacial de alcalinidad total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, Baja California, México. B.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, 65 pp.
- Lara-Lara JR, Álvarez-Borrego S. 1975. Ciclo anual de clorofilas y producción orgánica primara en Bahía San Quintín, Baja California. *Cienc. Mar.* 2: 77–97.
- Martori-Oxamendi JI. 1989. Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín, BC. M.Sc. thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Mexico, 110 pp.
- Millán-Núñez R, Álvarez-Borrego S, Nelson DM. 1982. Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 15: 317–335.
- Monreal-Gómez MA. 1980. Aplicaciones de un modelo de dispersión en Bahía San Quintín, Baja California, México. M.Sc. thesis, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Mexico, 90 pp.
- Ocampo-Torres FJ. 1980. Análisis y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, BC, México. B.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, 90 pp.
- Ortiz-Pérez MA, Lanza-Espino DL. 2006. Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional. Serie Textos Universitarios, Instituto de Geografía, UNAM, México 137 pp.
- Plascencia-Díaz R. 1980. Determinación de la circulación en Bahía San Quintín, BC, por gradientes de densidad. B.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, 123 pp.

- Valle-Levinson A, Gutiérrez-de-Velasco G, Trasviña A, Souza AJ, Durazo R, Mehta AJ. 2009. Residual exchange flows in subtropical estuaries. *Estuar. Coasts* 32: 54–67.
- Ward DH, Morton A, Tibbitts LT, Douglas DC, Carrera-González E. 2003. Long-term change in eelgrass distribution at Bahía San Quintín, Baja California, Mexico, using satellite imagery. *Estuaries* 26: 1529–1539.
- Ward DH, Tibbitts TL, Morton A, Carrera-González E, Kempa R. 2004. Use of digital multispectral videography to assess seagrass distribution in San Quintín Bay, Baja California, México. *Cienc. Mar.* 30: 47–60.

*Received December 2009;
accepted July 2010.*